

PSZCZÓŁKOWSKI Józef¹
TRAWIŃSKI Grzegorz²

NAPĘDZANIE WAŁU KORBOWEGO SILNIKA ROZRUSZNIKIEM ELEKTRYCZNYM I PNEUMATYCZNYM

Moment oporu silnika nie ma wartości stałej. Wynika to z występowania sił gazowych (przemian ładunku w cylindrach) oraz mas poruszających się ruchem posuwisto-zwrotnym. Scharakteryzowano napędzanie wału korbowego silnika spalinowego przez elektryczny i pneumatyczny układ rozruchowy. Wskazano cechy procesu wynikające ze zmian momentu oporu silnika oraz właściwości źródła energii – układu rozruchowego. Porównano stopień nierównomierności prędkości obrotowej wału korbowego silnika napędzanego tymi układami. Przedstawiono wyniki badań napędzania wału korbowego silnika przez elektryczny układ rozruchowy oraz analizę porównawczą napędzania wału korbowego silnika. Omówiono zmiany charakterystyki mocy i parametrów pracy rozrusznika elektrycznego i pneumatycznego pod wpływem zmiany temperatury.

ENGINE CRANKSHAFT DRIVING WITH THE HELP OF ELECTRIC AND PNEUMATIC STARTER

Piston engine resistance torque has not a constant value. It is because of gaseous forces existing (charge processes) and masses moving forward and backward. The engine crankshaft driving by electric and pneumatic starting unit is characterised. The features of its process are pointed being the consequence of engine resistance torque changes and properties of energy source – starting unit. The inequality of engine crankshaft rotational speed driven with the help of these units is compared. The test results of engine crankshaft driving by electric starting unit are presented and the comparative analysis of crankshaft driving with the help of these starting units as well. There is discussed the temperature change influence on power characteristics and operating parameters of electric and pneumatic starter.

1. WSTĘP

Rozruch tłokowego silnika spalinowego polega na jego przejściu ze stanu spoczynku do stanu wypełniania funkcji użytkowych – wytwarzania momentu sił (obrotowego) na

¹Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2.
Tel.: + 48 22 683 72 06, Fax.: +48 22 683 71 21, E-mail: jpszczolkowski@wat.edu.pl

² Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2.
Tel.: + 48 22 683 70 46, Fax.: +48 22 683 71 21, E-mail: gtrawinski@wat.edu.pl

pokonanie oporów własnych ruchu celem podtrzymania działania i przekazywania momentu do odbiorników zewnętrznych. W praktyce jedyną metodą zainicjowania samoczynnego powtarzania procesów roboczych w cylindrach silnika jest napędzanie jego wału korbowego przez układ rozruchowy. Zadaniem układu rozruchowego jest więc zrównoważenie momentu oporów ruchu silnika i nadanie wałowi korbowemu niezbędnej dla jego uruchomienia prędkości obrotowej. Wartość wymaganej dla zaistnienia rozruchu minimalnej prędkości obrotowej wzrasta wraz ze spadkiem temperatury.

Dlatego szczególnie wysokie wymagania w zakresie skuteczności działania są stawiane układom rozruchowym w warunkach obniżonej temperatury otoczenia i silnika. Przyczyny trudności uruchomienia silników, zarówno o zapłonie samoczynnym jak i iskrowym, w niskiej temperaturze otoczenia są analogiczne. Jako konsekwencja zasysania do cylindrów wychłodzonego powietrza zmniejszeniu ulegają wartości parametrów termodynamicznych sprężanego ładunku powietrza – temperatury i ciśnienia (zwłaszcza silniki o ZS). Wskutek obniżenia temperatury i zwiększenia lepkości paliwa pogorszeniu ulegają charakterystyki jego rozpylenia (dokładność i jednorodność), co oczywiście skutkuje spowolnieniem parowania, tworzenia i zapłonu mieszanki palnej.

Drugą przyczyną trudnego rozruchu silników w niskiej temperaturze jest obniżenie prędkości obrotowej napędzania wału korbowego przez układ rozruchowy. Wynika to z wpływu temperatury na lepkość olejów smarujących. Skutkiem zaś jest zwiększenie momentu oporu silnika. Równocześnie następuje zmniejszenie mocy układu rozruchowego wywołane, w przypadku elektrycznego układu rozruchowego, zwiększeniem rezystancji wewnętrznej i obniżeniem pojemności użytecznej akumulatora kwasowego.

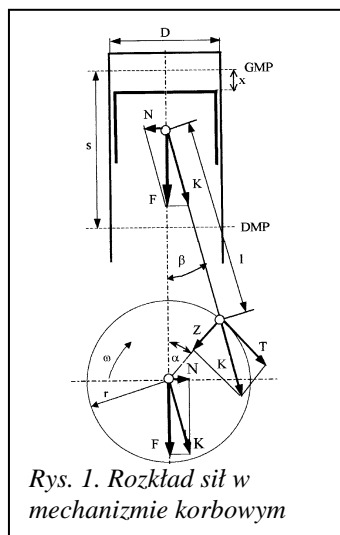
Podkreślić należy, że prędkość obrotowa wału korbowego, zależna od mocy układu rozruchowego i momentu oporu silnika, jest podstawowym czynnikiem wymuszenia dla procesów rozruchu silników. Znanym jest fakt, że wartości chwilowe rozruchowego momentu oporu silnika i prędkości obrotowej wału korbowego napędzanego przez rozrusznik zmieniają się w dość znacznym zakresie. Powodują one znaczne zmniejszanie wartości prędkości obrotowej w okresach zbliżania się tłoka do położenia GMP, co niekorzystnie wpływa na parametry termodynamiczne sprężanego w cylindrze ładunku powietrza i charakterystykę wtryskiwania paliwa. Stopień nierównomierności prędkości chwilowej w fazie wstępnej rozruchu jest zależny od liczby cylindrów silnika i mocy układu rozruchowego, a więc pośrednio od średniej wartości prędkości obrotowej wału korbowego, oraz cech jego działania.

Łatwo jest wykazać, że właściwości rozruchowe silnika spalinowego napędzanego przez rozrusznik zależne są nie tylko od wartości średniej prędkości obrotowej, ale także od dynamiki napędzania wału, a więc od przebiegu zmian chwilowej prędkości obrotowej. Szczególnie istotna jest jej wartość w otoczeniu GMP, a więc w okresie wtryskiwania paliwa, gdyż ma to bezpośredni wpływ na charakterystykę jego rozpylenia oraz stan ładunku powietrza. Dlatego charakterystyka procesu napędzania wału korbowego przez układ rozruchowy daje możliwość oceny wpływu tego układu, jego właściwości na przebieg rozruchu silnika, a stąd i wykazywane właściwości rozruchowe.

Układ rozruchowy elektryczny oraz pneumatyczny należą do najczęściej stosowanych w różnych warunkach w silnikach trakcyjnych i stacjonarnych. Podjęto próbę oceny porównawczej cech tych układów i ich wpływu na rozruch silnika wyposażonego w dany typ układu. Opis procesu napędzania wału korbowego silnika przez układ rozruchowy wymaga poznania cech obciążającego momentu oporu, jak też właściwości układu.

2. CHARAKTERYSTYKA NAPĘDZANIA WAŁU KORBOWEGO SILNIKA

Moment oporu silnika nie jest wielkością stałą. Jego zmienność w trakcie jednego cyklu pracy wynika ze sprężania ładunku w poszczególnych cylindrach i wywieranego przez ciśnienie gazu nacisku na tłok, a stąd i na łożyska wału korbowego.



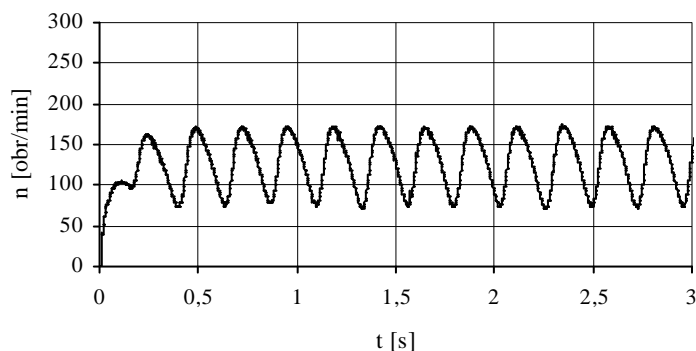
Rys. 1. Rozkład sił w mechanizmie korbowym

Na rys. 1. przedstawiono rozkład sił w mechanizmie korbowym silnika pochodzących od sił gazowych – ciśnienia sprężanego w cylindrze powietrza. Chwilowe położenie tłoka względem GMP w funkcji kąta obrotu wału korbowego można określić zależnością:

$$x = r(1 - \cos \alpha) + l(1 - \cos \beta) \quad (1)$$

gdzie: α – kąt obrotu wału korbowego,
 β – kąt odchylenia korbowodu,
 r – promień wykorbienia wału korbowego,
 l – długość korbowodu.

Znając wartość siły gazowej F i wykorzystując zależności geometryczne w mechanizmie korbowym można określić składowe siły i momentu oporu. Zmiany chwilowej wartości momentu oporu determinują podczas rozruchu silnika – napędzania jego wału korbowego za pomocą rozrusznika – odpowiednie zmiany prędkości obrotowej wału korbowego, niekorzystne dla procesów tworzenia i samozapłonu mieszanki paliwowo-powietrznej, które zachodzą w okresach zmniejszenia prędkości obrotowej. Stopień nierównomierności prędkości chwilowej (i momentu oporu) jest zależny od wartości składowej stałej i zmiennej momentu oporu, liczby cylindrów silnika i mocy układu rozruchowego. Przebieg chwilowej prędkości obrotowej wału korbowego silnika AD4.236 podczas napędzania za pomocą rozrusznika w niskiej temperaturze otoczenia przedstawiono na rys. 2.

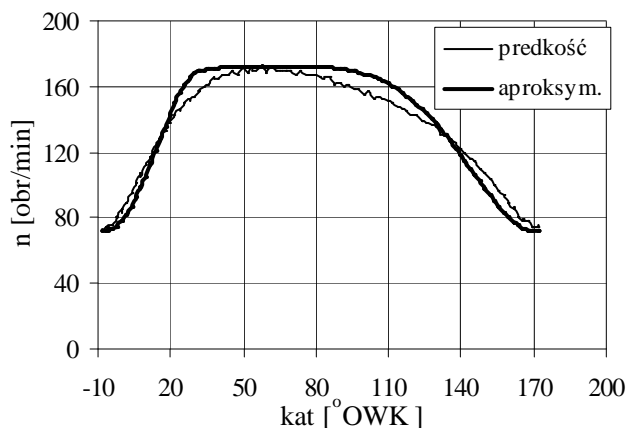


Rys. 2. Przebieg zmian chwilowej prędkości obrotowej wału korbowego silnika AD4.236 w początkowym okresie jego rozruchu w niskiej temperaturze

Dla przedstawionego na rys. 3 fragmentu powyższego przebiegu w zakresie cyklu przemian gazu w jednym cylindrze silnika AD4.236 wartość średnia (w czasie) prędkości obrotowej jest równa ok. 128,0 obr/min, a średnia arytmetyczna jej wartości maksymalnej i minimalnej 122,3 obr/min. Stopień nierównomierności prędkości obrotowej δ_r , definiowany jako stosunek amplitudy prędkości do średniej arytmetycznej jej wartości minimalnej i maksymalnej:

$$\delta_r = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{2} : \frac{n_{\max} + n_{\min}}{2} = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{n_{\max} + n_{\min}} \quad (2)$$

jest równy 0,41. Minimalna wartość prędkości (najwyższa wartość momentu oporu) występuje przy położeniu tłoka około 8 stopni przed GMP. Jest oczywiste, że w zakresie wyższych niż rozruchowe prędkości obrotowych wału korbowego (zakres prędkości pracy silnika) stopień nierównomierności prędkości i momentu oporu jest znacznie mniejszy.



Rys. 3. Fragment przebiegu chwilowej prędkości obrotowej wału korbowego silnika AD4.236 napędzanego przez układ rozruchowy wraz z linią aproksymującą

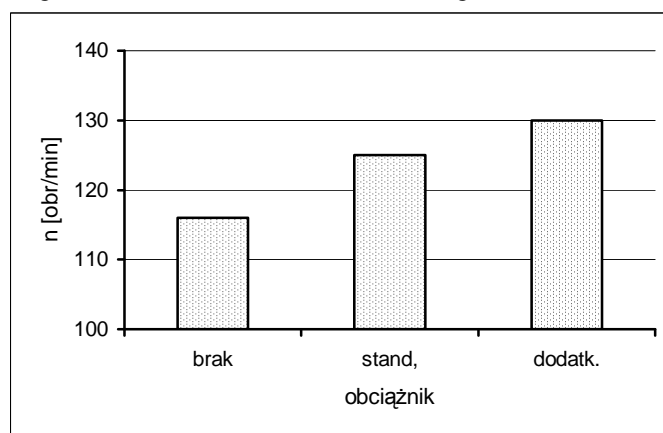
Dla warunków napędzania wału korbowego silnika przez rozrusznik zachodzi nieoczekiwana relacja między momentem bezwładności mas wirujących silnika, a średnią prędkością jego napędzania przez rozrusznik elektryczny. Opis napędzania wału korbowego przez układ rozruchowy może być dokonany za pomocą równania ruchu:

$$M_r = M_s + M_z + I \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

gdzie: M_r – moment siły rozrusznika,
 M_s – składowa stała momentu oporu silnika,
 M_z – składowa zmienna oporu,
 I – moment bezwładności mas wirujących,
 ω – przyśpieszenie kątowe wału korbowego silnika.

Analiza równana (3) pozwala stwierdzić, że moment bezwładności pełni rolę czynnika stabilizującego obciążenie rozrusznika. Jego zwiększenie powoduje zmniejszenie stopnia nierównomierności prędkości obrotowej. Na rys. 4 przedstawiono zaś wartości średnie prędkości obrotowej wału silnika AD4.236 podczas rozruchu w temperaturze $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$:

1. *brak* – wał korbowy bez obciążników mocowanych do koła zamachowego;
2. *stand.* – do koła zamocowano obciążnik standardowy zastępujący masę i moment bezwładności sprzęgła (masa 29,4 kg, moment bezwładności około $0,6\text{ kg}\cdot\text{m}^2$);
3. *dodatk.* – do koła zamachowego mocowano standardowy i dodatkowy obciążnik o masie 34 kg, momencie bezwładności około $0,7\text{ kg}\cdot\text{m}^2$.



Rys. 4. Wartości średnie prędkości obrotowej wału korbowego silnika AD4.236 podczas rozruchu w zależności od wielkości momentu bezwładności mas wirujących

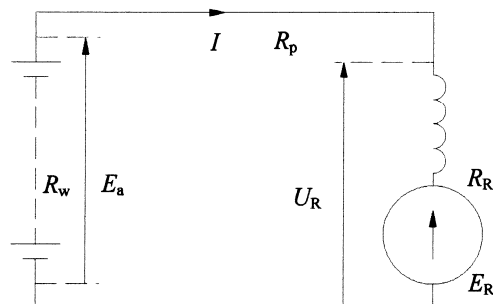
Interesujące jest, że od momentu bezwładności mas wirujących zależy wartość średnia prędkości obrotowej wału korbowego, przy czym wzrasta ona wraz ze wzrostem momentu bezwładności. Takie zależności prędkości napędzania wału korbowego wynikają z charakterystycznych, dynamicznych właściwości elektrycznego układu rozruchowego.

3. CECHY ELEKTRYCZNEGO UKŁADU ROZRUCHOWEGO

Elektryczny układ rozruchowy składa się z szeregowego lub szeregowo-bocznikowego silnika prądu stałego zasilanego z akumulatora kwasowego. Rozrusznik elektryczny wyposażony jest w mechanizm sprzęgający pozwalający na jego połączenie w czasie rozruchu z wałem korbowym silnika za pomocą przekładni zębatej. Przekładnia pozwala na optymalizację wymiarów i masy układu rozruchowego [1].

Schemat elektryczny obwodu rozruchowego silnika przedstawiono na rysunku 5. Na skutek obracania wirnika silnika elektrycznego w uzwojeniach twornika indukuje się siła elektromotoryczna E_R , której wartość jest zależna od strumienia magnetycznego Φ_{wz} uzwojenia wzbudzenia, stałej konstrukcyjnej rozrusznika c_m oraz prędkości obrotowej n :

$$E_R = c_m \Phi_{wz} n \quad (4)$$



Rys. 5. Schemat obwodu szeregowego silnika elektrycznego rozrusznika – wg [1]

Równowagę napięć w obwodzie rozrusznika można zapisać:

$$E_R = E_A - \Delta U_{SZ} - IR \quad (5)$$

gdzie: ΔU_{SZ} – spadek napięcia na szczotkach,

R – sumaryczna rezystancja obwodu.

Moment obrotowy rozrusznika (moment elektromagnetyczny) powstaje jako wynik oddziaływania pola magnetycznego na przewodnik z prądem i jest równy [2]:

$$M_{em} = c_1 \Phi_{wz} I = c_1 c_2 I^2 = c I^2 \quad (6)$$

gdzie: I – natężenie płynącego prądu,

c_1, c_2, c – stałe konstrukcyjne silnika rozrusznika.

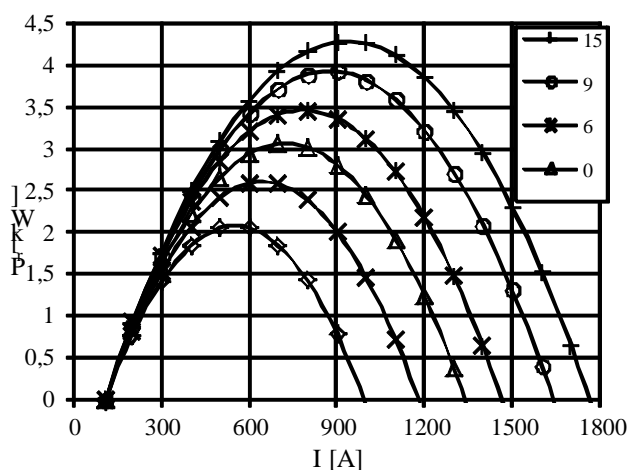
Moment obrotowy jest funkcją kwadratową natężenia prądu, jednak ze względu na nasycenie obwodu magnetycznego rozrusznika, od pewnej wartości natężenia jego przebieg ma charakter prawie liniowy. Charakterystyka momentu siły rozrusznika od natężenia prądu jest najważniejszą jego charakterystyką i jest korzystna dla rozruchu silnika spalinowego. Moment siły osiąga maksimum w chwili włączenia rozrusznika, gdy zębnek jest w stanie zablokowania i przez rozrusznik płynie prąd zwarcia I_z . Pozwala to na szybki wzrost prędkości obrotowej wału korbowego silnika w chwili włączenia rozrusznika.

Moc elektromagnetyczna rozrusznika jest iloczynem siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniach twornika i natężenia prądu pobieranego przez silnik:

$$P_E = E_R I = (E_A - \Delta U_{SZ}) I - I^2 R \quad (7)$$

Moc na wale rozrusznika P_2 jest mniejsza od jego mocy wewnętrznej P_E o straty mechaniczne i magnetyczne, które rosną ze wzrostem prędkości obrotowej wirnika. Charakterystyka $P_2 = f(I)$ przebiega poniżej charakterystyki $P_E = f(I)$ i rozpoczyna się w punkcie określającym prąd biegu jałowego I_0 . Kształtując napięcie zasilania (natężenie pobieranego prądu) można w szerokim zakresie zmieniać wartość prędkości i mocy rozrusznika. Wskazuje na to przedstawiany w literaturze i znany zbiór charakterystyk rozrusznika w przypadku jego zasilania akumulatorami o różnej pojemności [2].

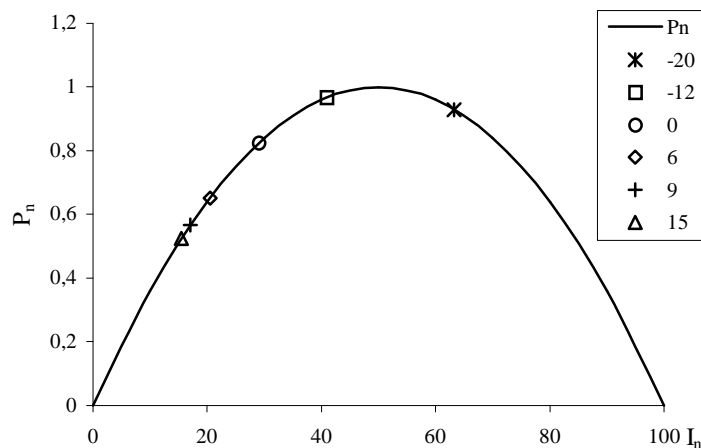
Charakterystyka mocy rozrusznika w warunkach danego rozruchu silnika nie jest znana, ponieważ przy zmiennych wartościach temperatury następuje również zmiana cech akumulatora kwasowego zasilającego rozrusznik. Opracowano metodę wyznaczania tej charakterystyki wykorzystującą możliwość jej przedstawienia za pomocą wielomianu drugiego stopnia na podstawie znanych parametrów napędzania wału korbowego. Na podstawie opracowanej metodyki wyznaczono (rys. 6) rzeczywiste charakterystyki mocy rozrusznika R11g podczas rozruchu silnika AD4.236 w różnych temperaturach otoczenia.



Rys. 6. Przebieg charakterystyk mocy rozrusznika R11g podczas rozruchu silnika AD4.236 w różnej temperaturze (wg legendy w [°C])

W każdej temperaturze rozrusznik pracuje na innej rzeczywistej charakterystyce mocy. Następuje zmiana charakterystyki mocy wraz z obniżaniem wartości temperatury w kierunku malejących mocy maksymalnych oraz zmniejszania wartości prądu zwarcia.

Dla porównania i oceny zmian punktu pracy rozrusznika podczas rozruchu silnika w różnych temperaturach konieczne jest ich odniesienie do jednej normowanej charakterystyki mocy. Przyjęto dla niej również postać krzywej drugiego stopnia i stałe bezwymiarowe wartości normowanych współrzędnych natężenia prądu i mocy dla następujących punktów odniesienia: natężenie prądu biegu jałowego, prądu zwarcia, mocy maksymalnej. Na charakterystyce normowanej (rys. 7) można zauważyć przemieszczanie punktu pracy wraz z obniżaniem wartości temperatury w kierunku wzrastających wartości normowanego natężenia prądu. W obszarze do -12 °C (przed maksimum natężenia prądu) obserwowano nieznaczne zmniejszanie prędkości wału korbowego silnika przy spadku temperatury rozruchu, oraz możliwość jego napędzania z ustaloną prędkością obrotową w dostatecznie długim czasie. Po przekroczeniu punktu mocy maksymalnej (w temperaturze -20 °C) prędkość obrotowa wału korbowego wymuszana przez rozrusznik maleje bardzo szybko i nie jest możliwe zapewnienie uruchomienia silnika.



Rys. 7. Położenie punktów pracy rozrusznika R11g na charakterystyce normowanej w różnych temperaturach pracy (w °C) – I_n , P_n – normowane natężenie prądu i moc

4. CHARAKTERYSTYKA ROZRUSZNIKÓW PNEUMATYCZNYCH

Czynnikiem oddziaływania rozruszników pneumatycznych jest ciśnienie statyczne gazu (powietrza) lub równoważne mu ciśnienie dynamiczne. Odpowiednio ciśnienie dynamiczne Δp_d oraz powierzchniowa gęstość mocy strumienia powietrza δ_p są równe:

$$\Delta p_d = 0,5 \rho w^2; \quad \delta_p = 0,5 \rho w^3 \quad (8)$$

gdzie: ρ – gęstość powietrza, w – prędkość strumienia powietrza.

Układy pneumatyczne wymagają elementów o dość dużych wymiarach i masach, przede wszystkim zbiorników powietrza i sprężarek. Dlatego znalazły zastosowanie w przypadku, gdy te czynniki nie stanowią istotnego kryterium efektywności, jak:

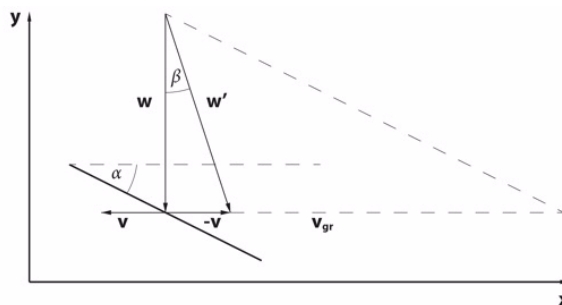
- silniki trakcyjne i stacjonarne dużych pojemności i mocy (np. silniki pojazdów wojskowych i innych specjalnych, silniki okrętowe),
- zastosowania specjalne, ze względów bezpieczeństwa – przemysł naftowy, kopalnie.

Wśród rozruszników pneumatycznych można wyróżnić następujące rodzaje: rozruszniki pneumatyczne bezwładnościowe, z silnikiem turbinowym oraz ciśnienia statycznego.

Rozrusznik pneumatyczny bezwładnościowy działa podobnie jak ręczny, bądź elektryczny. Koło zamachowe o dużym momencie bezwładności jest napędzane sprężonym powietrzem kierowanym na umieszczone na nim łopatki i łączone za pomocą sprzęgła z wałem korbowym po osiągnięciu odpowiedniej prędkości obrotowej.

Rozruszniki z silnikiem turbinowym mają budowę i działanie podobne jak typowe rozruszniki elektryczne. Występuje tu przekładnia i element sprzęgający rozrusznik z silnikiem, a miejsce silnika elektrycznego zajmuje napęd turbinowy. Rozruszniki tego typu są stosowane do uruchamiania silników o bardzo szerokim przedziale pojemności i mocy, np. rozruszniki firmy TDI TechDevelopment – od 6 do 300 dm³ [3].

Podstawowymi charakterystykami tego typu rozruszników, podobnie jak rozruszników elektrycznych są: zależność momentu siły i mocy od prędkości obrotowej turbiny. Charakter tych zależności można określić rozpatrując w uproszczeniu wycinek łopatki turbiny o powierzchni S poruszający się z prędkością liniową v i poddany działaniu strumienia powietrza o prędkości w i kierunku równoległym do osi obrotu – rys. 8.



Rys. 8. Schemat wycinka łopatki turbiny poddanego działaniu strumienia powietrza

W przypadku ruchu łopatki z prędkością v należy rozpatrywać prędkość względną strumienia gazu w' względem niej jako czynnik wymuszający, tj. sumę wektorową prędkości strumienia i łopatki turbiny. Łatwo zauważyć, że moment napędowy nie jest wytwarzany jeżeli kąt $\beta = \pi/2 - \alpha$, tj. strumień gazu przepływa stycznie do powierzchni.

Wówczas prędkość graniczna: $v = v_{gr} = w \cdot \operatorname{ctg} \alpha$.

Wartość wytworzonego momentu napędowego na powierzchni S jest równa:

$$M = 0,5k_a r \rho w^2 S \sin \alpha \left(1 - \frac{v}{v_{gr}} \right) \quad (9)$$

gdzie: k_a – współczynnik aerodynamiczny łopatki uwzględniający jej kształt i związaną z nim sprawność zamiany energii strumienia gazu na energię turbiny,
 r – promień łopatki,

α – kąt między kierunkiem strumienia powietrza a prostopadłą do rozpatrywanego wycinka łopatki turbiny.

Z wyrażenia (11) (po zastąpieniu v prędkością obrotową – n) wynika, że moment napędowy turbiny jest liniowo zależny od jej prędkości obrotowej i osiąga wartość największą w stanie zablokowania rozrusznika (podobnie jest w przypadku rozrusznika elektrycznego). Moc rozrusznika otrzymamy po pomnożeniu jego momentu napędowego przez prędkość kątową – charakterystyka mocy jest więc funkcją kwadratową prędkości obrotowej turbiny. Dla różnych wartości ciśnienia powietrza zasilającego rozrusznik możemy odpowiednio otrzymać rodzinę jego charakterystyk momentu napędowego i mocy.

Porównanie i analiza tych charakterystyk dla rozrusznika elektrycznego [2] oraz rozrusznika pneumatycznego [3] wykazuje wprost ich znaczne podobieństwo. Wskazuje to więc, że dynamika napędzania wału korbowego silnika za pomocą tego typu rozruszników

jest analogiczna. Podatność pneumatycznego układu rozruchowego na zmianę temperatury otoczenia (i gazu w zbiorniku) jest nieco inna niż układu elektrycznego. Jeżeli ładowanie zbiornika nastąpiło przed obniżeniem temperatury, gaz podlega przemianie izochorycznej i rozrusznik zasilany jest niższym ciśnieniem w przypadku, gdy nie stosuje się zaworu redukcyjnego ciśnienia. W przypadku stosowania zaworu redukcyjnego nie następuje zmiana ciśnienia, lecz zmniejszenie pojemności zgromadzonego w zbiorniku gazu. Jeżeli ładowanie następuje po obniżeniu temperatury, to skutki tego obniżenia nie występują. Zatem w układzie pneumatycznym nie występuje zjawisko trwałego obniżenia pojemności, jak to ma miejsce w przypadku akumulatora kwasowego przy obniżeniu jego temperatury.

Układ rozruchowy sprężonym powietrzem jest układem o statycznym oddziaływaniu ciśnienia gazu. Jest także stosowany w silnikach o ZS o dużych pojemnościach – średnicach tłoka powyżej 150 – 180 mm. W silnikach wojskowych pojazdów specjalnych (czołgi, transportery opancerzone) stosuje się zazwyczaj dwa niezależne układy rozruchowe: elektryczny i powietrzny. Sprężone powietrze jest doprowadzone do przestrzeni nadtłokowej kolejnych cylindrów w suwie rozprężania i napędza wał korbowy. Przewód łączący silnik z butlą powietrza jest zaopatrzony w zawór rozruchowy, za pomocą którego otwiera się dopływ sprężonego powietrza do rozdzielacza i zaworów rozruchowych na głowicy silnika. Silnik wielocylindrowy powinien dać się uruchomić w ten sposób z każdego położenia wału korbowego. Jeżeli przedział kątowy doprowadzania powietrza może być równy około 120° , to warunek ten może spełnić silnik 6-cio cylindrowy.

Układ rozruchowy sprężonym powietrzem podlega podobnemu oddziaływaniu obniżonej temperatury, jak rozrusznik z silnikiem turbinowym. Pod tym względem ma więc również korzystniejsze właściwości niż elektryczny układ rozruchowy.

Jednakże podczas napędzania wału korbowego silnika należy w tym przypadku oczekiwać negatywnych oddziaływań powietrza rozruchowego na przebieg napędzania wału korbowego silnika oraz proces rozruchu:

- dodatkowe obciążenie tłoków i łożysk siłami gazowymi – zwiększenie momentu oporu,
- wychłodzenie komory spalania przez rozprężające się powietrze rozruchowe,
- zmniejszenie momentu napędowego w okresie osiągnięcia położenia GMP przez tłok cylindra, w którym realizowany jest suw sprężania.

5. WNIOSKI

Ze względu na cykliczność procesów roboczych silnika tłokowego, zwłaszcza sprężania ładunku powietrza w cylindrach, jego moment oporu oraz prędkość obrotowa wału korbowego podczas rozruchu (napędzania przez układ rozruchowy) charakteryzuje duży stopień zmienności. Dynamika napędzania wału wynika również z cech dynamicznych układu rozruchowego i ma wpływ na łatwość uruchomienia silnika (zwłaszcza o ZS). Układy rozruchowe elektryczny i pneumatyczny, w szczególności z napędem turbinowym, cechuje znaczne podobieństwo właściwości dynamicznych, a różni podatność na zmiany warunków działania powodowanych zmiennością temperatury otoczenia i układu.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Pijanowski B.: *Rozrusznik*, Warszawa, WKŁ, 1993.
- [2] Pomykalski Z.: *Elektrotechnika samochodowa*, Warszawa PWN, 1983.
- [3] <http://www.tdi-turbotwin.com/>